

철도교대 뒤채움재료의 시멘트 혼합 비율에 따른 강도 및 침하특성 분석

Analysis of Settlement Characteristics and Strength of Cement Mixing Ratio for a Backfill Material at a Railway Abutment

양 상 범 ¹	Yang, Sang-Beom	최 찬 용 ²	Choi, Chan-Yong
김 낙 경 ³	Kim, Nak-Kyung	김 태 균 ⁴	Kim, Tae-Kyun

Abstract

Backfill materials of rail abutment were commonly composed with cement treated aggregate, general aggregate and soil. The friction angle of cement treated aggregate increased up to 40° or more due to strength enhancement. However, 30°~35° of friction angle was typically applied for in-situ condition. This phenomenon could cause over-designing, therefore, it is essential to determine reasonable material properties of cemented treated aggregate. In this study, a series of CBR tests and circular model tests have been conducted for cement treated aggregate, while changing cement mixing ratio. Based on test results, characteristics of settlement and strength have been analyzed quantitatively. The settlement of cement treated aggregate decreased with the number of cyclic loading and aging period. In addition, The strength increment ratio in CBR test increased up to 13~16 times at 28 days aging.

요 지

국내 철도교대 뒤채움재의 구조는 시멘트 안정처리된 골재, 일반 골재, 토사로 되어 있다. 시멘트 안정처리된 골재는 강도 증진효과로 인해 내부마찰각이 40°이상 증가 된다. 그러나 실무에서는 교대설계 시 경험치인 30~35°의 내부마찰각을 적용한다. 이는 과다설계의 원인이 될 수 있으므로 합리적인 물성치 값의 설정이 필요하다. 본 논문은 원형모형 실험과 CBR 실험을 통해 시멘트 안정처리된 골재의 시멘트 혼합 비율에 따른 강도 및 침하특성을 정량적으로 분석하였다. 시멘트 안정처리된 골재의 침하율은 반복재하 함에 따라 감소하였다. 또한 양생함에 따라 침하량이 감소하였다. 재령 28일 기준으로 일반골재 대비 시멘트 안정처리된 골재의 CBR 증가율은 13~16배 증가하였다.

Keywords : Backfill material, Cement treated aggregate, Curing, CBR, Cyclic loading

1 정희원, 성균관대학교, 건설환경시스템공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil, Architecture and Environmental Systems Engrg., Sungyunkwan Univ.)
2 정희원, 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 책임연구원 (Member, Principal Researcher, High-Speed Railway Research Division, Korea Railroad Research Institute, Tel: +82-031-460-5317, Fax: +82-31-460-5032, cychoi@krii.re.kr, Corresponding author, 교신저자)
3 정희원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 정교수 (Member, Prof., Dept. of Civil, Architecture and Environmental Systems Engrg., Sungyunkwan Univ.)
4 비희원, 인천대학교 건설환경시스템공학과 학사 (Student, Dept. of Civil and Environment Engrg., Incheon National Univ.)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 우리나라는 철도교통량의 증대와 더불어 경제성장의 기반을 위한 도로 및 철도 인프라 구축사업에 많은 투자가 이루어져 있다. 우리나라 특성상 산지와 하천을 통과하는 경우가 증가하여 도로 및 철도 건설 시 교대와 토공부분의 접속부 시공이 증가하고 있다. 접속구간은 궤도를 지지하는 하부구조물의 지지강성이 변화하는 구간이기 때문에 강성차이에 따른 부등침하가 발생하게 되며, 이때 열차의 이상 진동과 충격하중이 발생하게 된다. 열차의 이상 진동은 승차감을 저하시키고 결과적으로 열차의 주행안정성에 영향을 미치며, 충격하중은 노반의 침하와 궤도재료의 손상을 가속시키는 결과를 초래한다. 이러한 이유로 한국철도공사 및 한국철도시설공단에서는 이러한 구간을 취약구간으로 구분하여 교대 배면의 뒤채움재를 시멘트 안정처리를 하여 반복평판재하시험(DIN 18 134)에 E_v 값은 $E_{v2} \geq 120\text{MN/m}^2$, $E_{v2}/E_{v1} < 2.2$ 의 기준으로 급격한 지지강성 변화를 방지하도록 관리하고 있다.

교대 배면의 뒤채움재료는 시멘트안정처리를 하므로써 강도가 증진될 뿐만 아니라 토공과 구조물의 상대침하량을 최소화 시키고 승차감 저하를 방지한다.

시멘트 안정처리의 연구동향을 보면 Kim et al.(2005)은 Cemented Sand and Gravel(CSG)재료의 기초적인 강도특성을 파악하기 위하여 단위 시멘트 량을 변화시켜 다짐시험, 일축압축시험 그리고 대형 삼축 압축시험을 실시하고 단위 시멘트 량과 재령에 따른 압축강도, 탄성계수 그리고 응력-변형특성 등을 검토하여 각 인자별 상관식을 제시한 바 있다. Min et al.(2001)은 도시 개발로 인한 다량의 건설잔토의 유효이용을 위해 대상토에 생석회와 화학 첨가제를 혼합하여 안정처리를 할 경우 보조기층 및 노상용 재료로서의 사용 가능성을 평가하였으며, Park and Ji(2006)은 효율적인 안정처리 시공에 되기 위한 사전 단계로 기반재료에 안정제 배합 시 효과적인 방식에 대하여 살펴보고 이를 역학 및 포장 공용성 시험을 통해 비교 분석하였다. Lee et al.(2004)은 시멘트의 건조수축을 억제하여 표층부로의 반사균열을 억제할 수 있는 저 수축 시멘트 안정처리방법에 대한 연구를 무수축 혼화제 및 팽창제를 섞어 시멘트 안정처리 층의 건조수축을 최소화하는 저 수축 시멘트 기층지반의 특성에 대해 고찰하였다. Lee et al.(2011)은 최적함수비 상태에서 흙을 대상으로 시멘트와 플라이애시를 혼합하여

양생에 따른 거동을 평가한 결과 시멘트 함유량이 높을수록 높은 강도를 보이며 양생시간이 길수록 압축강도의 증가폭이 커진다고 발표하였다. Ronald et al.(1979)은 시멘트 안정처리 지반의 특성을 일축압축강도와 시멘트 함유량 관계는 선형관계로 나타나며, 시멘트 함유량이 증가할수록 일축압축강도는 증가하는 것을 검토하였다. 또한 일축압축강도와 휨강도 관계에서 일축압축강도가 증가할수록 휨강도도 같이 증진되는 것을 검토한 바 있다.

Korea Rail Network Authority(2013)에서는 쌓기, 되메우기 및 뒤채우기에 사용할 재료는 압축성이 작고 활성도가 작은 흙이어야 하며, 뒤채움 재료 사용하는 골재의 경우 내부마찰각(ϕ) $30^\circ \sim 35^\circ$ 을 기준 값으로 하도록 한다. 그러나 시멘트 안정처리된 골재는 강도 증진효과로 인해 내부마찰각이 $40^\circ \sim 45^\circ$ 까지 증가 되어 실무에서 교대설계 시 적용하는 기준 값인 $30^\circ \sim 35^\circ$ 을 적용할 경우 과다설계의 원인이 될 수 있다.

이에 본 논문은 철도교대 뒤채움재인 시멘트 안정처리된 골재가 양생에 따라 강도증진효과를 CBR 실험을 통해 정량적으로 분석 하였으며, 원형모형실험을 통해 반복하중에 따른 침하특성을 정량적으로 평가하였다.

2. 실험 개요 및 절차

2.1 재료특성

본 실험에서 사용된 노반재료는 고속철도 노선에서 철도교대-토공 접속부에 사용되는 일반골재와 시멘트 안정처리된 골재이다. 철도설계기준에 접속부 일반 골재

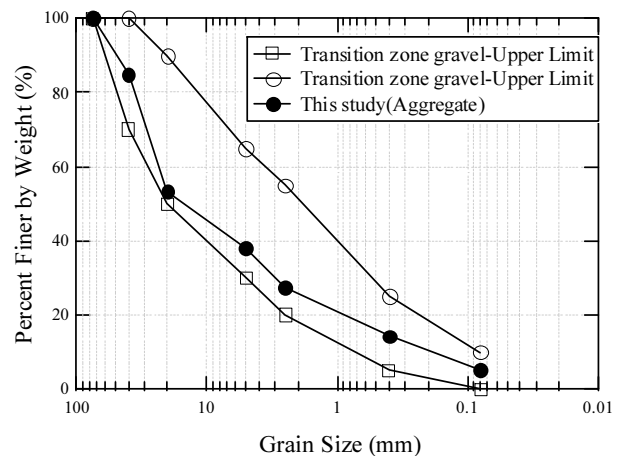


Fig. 1. Grain size distribution curve

Table 1. Properties of test materials

Materials	Compaction test			Grain size analysis	
	OMC (%)	ρ_{dmax} (kN/m ³)	Maximum size (mm)	0.08 mm pass rate (%)	Absorption ratio of Coarse aggregate (%)
Aggregate	7.7	21.90	75.0	5.2	1.1
3%Cement treated aggregate	7.6	21.93			
4%Cement treated aggregate	7.6	21.95			
5%Cement treated aggregate	7.5	21.98			

의 입도분포는 Fig. 1과 같이 범위가 제시되어 있으며, 시멘트 안정처리된 골재도 같은 입도에서 시멘트를 3% 추가하여 노반을 조성하도록 되어 있다. 사용된 노반재료의 입도분포곡선은 Fig. 1과 같으며 설계기준상의 입도분포 범위와 비교했을 때 재료가 균일하게 분포하고 있으며 설계기준에 만족하고 있다. 각 실험에 사용된 노반재료의 물성 값은 Table 1과 같으며 굵은 골재의 규정인 0.08mm 통과율 7%이하, 굵은 골재 흡수율 3%이하를 만족하고 있다.

2.2 실험장비 및 방법

교대 뒤채움재료의 반복하중에 따른 침하특성을 분석하기 위하여 원형모형 실험을 수행하였다. 원형 토조는 Fig. 2와 같이 45cm(D) × 50cm(H)의 크기로 변형이 발

생하지 않도록 상, 중, 하 부분에 강철로 고정하였다. 하중을 균등하게 발생하도록 원형 토조의 내경의 크기와 같은 재하판에 하중을 재하 하였으며, 토조 내에 토압계를 설치하였고 재하판 상부에 좌, 우측에 각각 1개씩 변위계를 설치하였다.

사용된 하중조건은 국내에 운행 중인 열차의 최대 축중인 250kN으로 시험하중을 구하였다. 시험하중 산정조건은 Table 2에서와 같이 최대축중(250kN)에 대한 윤중은 125kN으로 속도 충격율(*i*)을 곱하여 동적하중을 산정하였다. 속도 충격율(*i*)은 앞에서 제시한 바와 같이 이음레일의 경우와 장대레일의 경우로 된다(단, 속도 충격율은 최대 1.8로 된다).

시험하중은 원형 토조의 크기를 고려한 동적하중은 30kN으로 결정하였다. 하중재하방식은 반복하중조건으로 실험을 실시하여 최대하중 30kN으로 최소하중 10kN

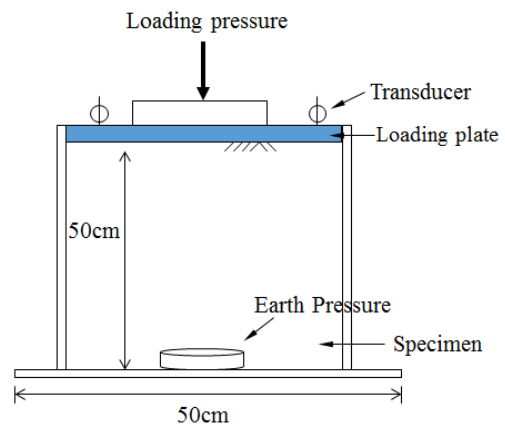


Fig. 2. Structural drawing of circular model test setup

Table 2. Test load condition

Category	Content
Test design speed and axial load	<ul style="list-style-type: none"> · Design speed : 200 km/h · Axial load 250 kN, Wheel load 125 kN · Wheelbase 2.5 m · Distance between centers of bigies 11.2 m ※ Speed impact rate : 1.6 (Rail joint : 1+0.5V/100, Continuous welded rail : 1+0.3V/100)

이 되도록 정현파로 가진 주파수 5Hz로 하중을 재하 하였다. 반복하중 재하 시 노반의 침하량은 정현파의 최대 피크 값의 데이터를 사용하여 침하량으로 분석하였다. 원형모형실험에서는 도상자갈의 침하거동은 평가하지 않고 노반자체의 침하만을 측정하기 위하여 도상자갈과 레일과 침목을 체결하지 않는 조건으로 실험을 실시하였다.

원형모형실험에 적용된 재하진동수는 열차의 대차간 거리(d), 열차주행 속도(V), 통과시간(T)으로 부터 식 (1)에 의하여 구하였다.

$$T = \frac{d}{V} \quad (1)$$

$$f = 1/T = V/d \quad (2)$$

여기서, 재하 진동수 $f = 1/T$ 이므로 식 (2)와 같다.

실험조건은 Table 3과 같으며 실험명이 C5A7인 경우는 시멘트 함유량이 중량대비 시멘트 5%를 혼합한 것으로 양생기간이 7일이 경과된 후 반복하중을 재하한 실험이다.

CBR시험은 노상토 지지력비(CBR) 시험방법(KS F 2320)을 적용하여 시험을 실시하였다. CBR시험에서는 Table 4와 같이 양생일이 0일, 3일, 7일, 12일 28일인 시멘트함유량별 안정처리된 골재를 대상으로 실험을 수행하여 양생일별, 시멘트함유량에 따른 CBR 값을 비교 분석하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 대형전단시험을 통한 내부마찰각

교대 접속부 뒤채움재료는 시멘트 안정처리된 골재, 일반 골재, 토사의 전단강도 시험을 실시하였다. 대형직

Table 3. Test condition of circular model test

No.	Test name	Content cement	Curing period (days)	No. of cyclic loading	Note
1	C0A0	0%	0	500,000	
2	C3A0	3%	0	500,000	
3	C4A0	4%	0	500,000	
4	C5A0	5%	0	500,000	
5	C3A7	3%	7	500,000	
6	C4A7	4%	7	500,000	
7	C5A7	5%	7	500,000	

Table 4. Test condition of CBR

Category	Content cement	Curing period (days)				
		0	3	7	12	28
Case 1	0%	0	3	7	12	28
Case 3	3%	0	3	7	12	28
Case 4	4%	0	3	7	12	28
Case 5	5%	0	3	7	12	28

Table 5. Parameter c, φ of each backfill materials

Materials	Vertical stress (kPa)	Shear stress (kPa)	Cohesion (kPa)	Internal friction angle (°)
Soil	100	103	35.7	32.95
	200	160		
	300	233		
Aggregate	100	109	33.5	37.21
	200	187		
	300	261		
Cement treated aggregate	100	121	36.0	40.38
	200	206		
	300	291		

접단시험은 변위제어방식으로 0.5~1.0%/mm의 전단 속도로 전단변형률이 15~20%에 접근할 때까지 실시하였으며, 시험체는 0.3×0.3×0.15m의 크기로 수직하중은 100kPa, 200kPa, 300kPa의 크기로 재하 하였다. 실험에 사용한 토사, 일반 골재, 시멘트 안정처리된 골재의 건조단위중량은 각각 19.23kN/m³, 19.77kN/m³, 19.67kN/m³이며, 내부마찰각은 32.95°, 37.21°, 40.38°로 Table 5와 같이 정리하였다. 시멘트 안정처리된 골재의 내부마찰각은 일반토사보다 약 23% 더 크게 나타났다.

3.2 원형모형 실험을 통한 침하특성

3.2.1 반복하중에 따른 침하모델

철도노반의 침하는 일반적으로 즉시 침하인 탄성침하와 소성침하로 나뉘지며, Sato(1997)는 반복재하에 따른 궤도침하모델을 식 (3)과 같이 정의하였으며, 이 모델 식은 두 단계의 궤도침하로서 Fig. 3과 같이 방정식의 첫 번째 부분 $\tau(1 - e^{-\alpha x})$ 은 다짐직후 궤도의 초기침하를 나타내며, βx 는 장기침하를 나타낸다.

$$y = \tau(1 - e^{-\alpha x}) + \beta x \quad (3)$$

여기서, y : 침하[mm], x : 하중반복횟수 또는 통과톤수, τ , α , β : 경험적 상수이다.

파라미터 α 는 초기 침하 종료 시까지의 하중반복횟수, τ 는 초기 침하의 크기, β 는 열차하중에 의한 궤도침하의 장기적인 전지과 관련된 인자를 나타낸다. 즉, 침하를 최소화하기 위해서는 파라미터 β 가 작아야한다.

3.2.2 원형모형 실험 결과

앞에서 기술한 침하모델을 적용하여 원형모형실험은 토조의 초기 침하를 제거하기 위해 안정화 작업을 실시하였다. 안정화 작업은 Fig. 4와 같이 단계별 정적하중을 10kN씩 증가하여 300초씩 재하 한 후 다시 반복하중을

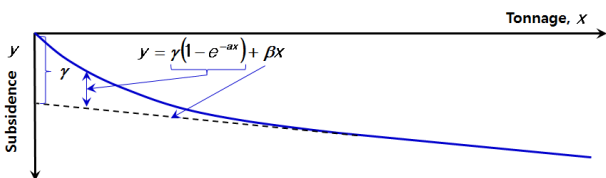


Fig. 3. Subsidence of track model (Sato,1997)

5Hz로 100회를 재하 하였다.

Fig. 5는 반복하중에 따른 침하량이다. 그림과 같이 일반 골재(C0A0)는 반복하중에 따른 침하량이 지속적으로 발생하는 반면 시멘트 안정처리된 골재는 반복하중에 따른 침하량이 수렴하며, 양생함에 따라 침하량도 감소하였다. 침하율은 Table 6과 같이 일반 골재(C0A0)을 기준으로 하여 산정하였다. C3A0의 침하율은 약 89.6%이며 재령 7일 경과한 C3A7은 약 65.8%로 23.9% 감소하였다. C4A0은 약 44.0%이며 재령 7일 경과한 C4A7은 약 31.8%로 12.1% 감소하였다. C5A0은 약 38.3%이며 재령 7일 경과한 C4A7은 약 20.8%로 17.6% 감소하였다. 시멘트함유량별 침하율은 재령 0일을 기준으로 38.3~89.6%로 감소하였으며, 재령 7일 기준으로 20.8~65.8% 감소하였다.

3.2.3 탄성침하량

얇은 기초에서 탄성침하는 Timoshenko and Goodier (1951)에 제안하고 있는 식 (4)와 같이 산정할 수 있다 (Bowles, 1979). 여기서 탄성계수는 Choi et al.(2015)의

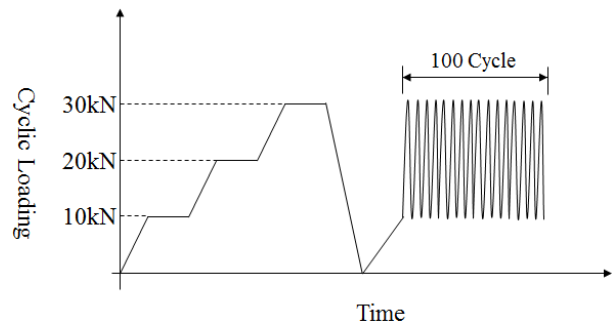


Fig. 4. Stabilization operation of roadbed

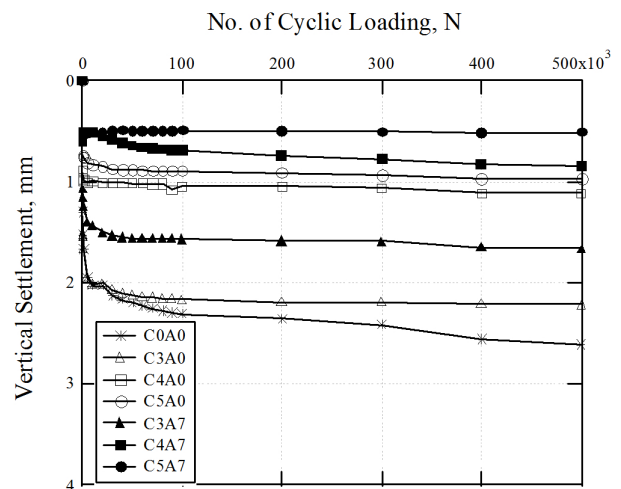


Fig. 5. Settlement of Cyclic loading

Table 6. Settlement (mm) and settlement ratio of cyclic loading

No. of cyclic loading (n)	100,000	200,000	300,000	400,000	500,000
Settlement (mm)					
C0A0	2.31	2.36	2.41	2.56	2.61
C3A0	2.17	2.19	2.19	2.20	2.21
C4A0	1.04	1.04	1.06	1.12	1.12
C5A0	0.89	0.91	0.94	0.97	0.98
C3A7	1.57	1.58	1.59	1.65	1.66
C4A7	0.69	0.74	0.78	0.84	0.85
C5A7	0.49	0.50	0.51	0.52	0.52
Settlement ratio (%) from based on C0A0					
C0A0	100	100	100	100	100
C3A0	93.94	92.80	90.87	85.94	84.67
C4A0	45.02	44.07	43.98	43.75	42.91
C5A0	38.53	38.56	39.00	37.89	37.55
C3A7	67.97	66.95	65.98	64.45	63.60
C4A7	29.87	31.36	32.37	32.81	32.57
C5A7	21.21	21.19	21.16	20.31	19.92

선행 연구를 참고하여 일반 골재와 3%시멘트 안정처리 된골재의 탄성계수는 150MPa, 1,000MPa로 가정 값으 로 사용하였으며, 포아송비는 0.3으로 가정하였다.

$$S_e = \frac{q_0 B}{E_s} (1 - \nu^2) \left(I_1 + \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} I_2 \right) I_F \quad (4)$$

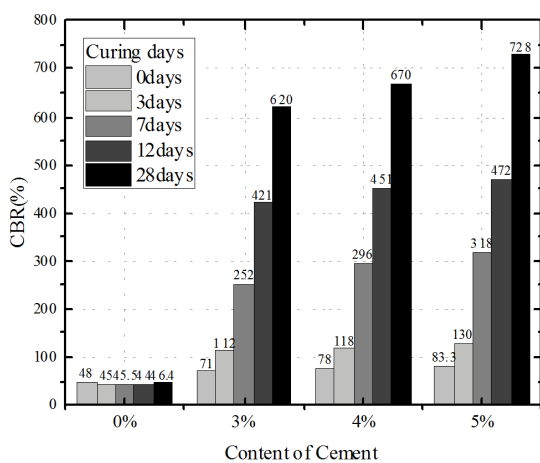
여기서, q_0 : 접촉압력(kPa), B=반경, I_i =영향계수(길이 와 폭, 깊이, 포아송비, 관입깊이에 따른 계수), E_s, ν =탄 성계수와 포아송비 이다.

식 (4)에 의한 탄성침하량은 일반골재는 0.4mm, 3% 시멘트 안정처리된골재는 0.06mm으로 계산 되었다. 일

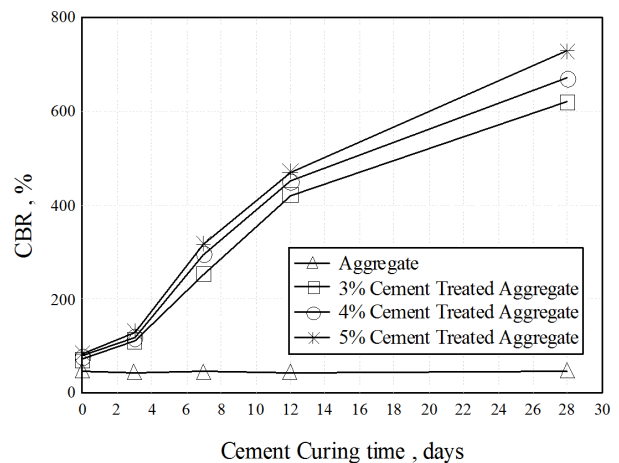
반골재의 탄성침하량이 3%시멘트 안정처리된 골재의 약 7배가 발생하였다.

3.3 CBR 실험을 통한 강도특성

Fig. 6(a)는 시멘트 함유량별로 양생기간에 따라 CBR 값의 변화를 도표로 나타내고 있다. 재령 0일차에는 일 반 골재 및 시멘트 안정처리된 골재가 시멘트 함유량에 따라 CBR값의 차이가 크지 않으나 재령 3일이 경과 후 시멘트 안정처리된 골재(3%, 4%, 5%)의 CBR값이 1.5 배 이상 증가하였다. 양생시간이 경과함에 따라 재령 28 일까지 1.5~8.7배의 CBR 값이 증가하였다. Fig. 6(b)는



(a) CBR-content cement



(b) CBR-Curing period

Fig. 6. Results of CBR test

시멘트 함유량별 CBR값의 변화를 나타내고 있다. 재령 28일을 기준으로 일반 골재 대비 시멘트 안정처리된 골재(3%, 4%, 5%)의 증가율은 약 13배에서 16배의 CBR 값이 증가하였다.

철도설계기준에서 제시하고 있는 슬래그의 CBR 최소요구 값인 80보다 약 7.8~9.1배 큰 값으로 시멘트 안정처리된 골재는 강화노반층 재료의 품질기준 이상의 강도가 있는 것으로 판단된다.

4. 고찰 및 제안

4.1 침하억제효과에 따른 최적 혼합비

시멘트 안정처리된 골재의 침하억제효과에 적합한 시멘트 혼합비를 검토하기 위해 반복재하 500,000회시의 침하감소율로 비교하였다. 침하감소율(Settlement Reduction ratio, %)은 식 (5)와 같이 일반 골재의 침하량을 기준으로 하여 일반 골재와 시멘트 안정처리된 골재의 침하 차로 나눈 값이다.

$$SR = (S_a - S_c) / S_a \quad (5)$$

여기서, SR은 침하감소율(%), S_a 은 일반 골재의 침하

량, S_c 은 시멘트 안정처리된 골재(3,4,5%)의 침하량 이다.

Table 7은 양생별 시멘트 함유량에 따른 침하 감소율이다. 양생 0일차의 시멘트 함유량에 따른 침하율은 Fig. 7(a)와 같이 시멘트 3%~4%에서 침하감소율 그래프가 상승하는 것을 나타냈다. 또한 양생 7일차의 침하율도 3%~4%에서 침하감소율 그래프가 상승하는 것을 나타냈다. 이는 침하억제효과를 고려해 볼 때 중량대비 4% 시멘트가 적합한 것으로 확인하였다.

4.2 강도증진효과에 따른 최적 혼합비

시멘트 안정처리된 골재의 강도 특성에 적합한 시멘트 혼합비를 검토하기 위해 각 시멘트 안정처리된 골재의 시멘트 1%당 CBR을 비교하였다. Fig. 8은 표준 양생 기준인 28일의 CBR을 대상으로 비교하였다. 이 그림에서 보면 각 1%당 CBR은 3%시멘트 안정처리된 골재에서 206.7, 4%, 5%시멘트 안정처리된 골재에서 각각 167.5, 145.6이며 시멘트 1%당 CBR의 최대 값은 2.5~3%으로 확인하였다. 이는 Fig. 6과 같이 시멘트의 함유량이 증가 될수록 강도는 증진 되지만 경제적 특성과 합리적인 혼합비를 고려해볼 때 중량대비 3% 시멘트가 적합한 것으로 확인하였다.

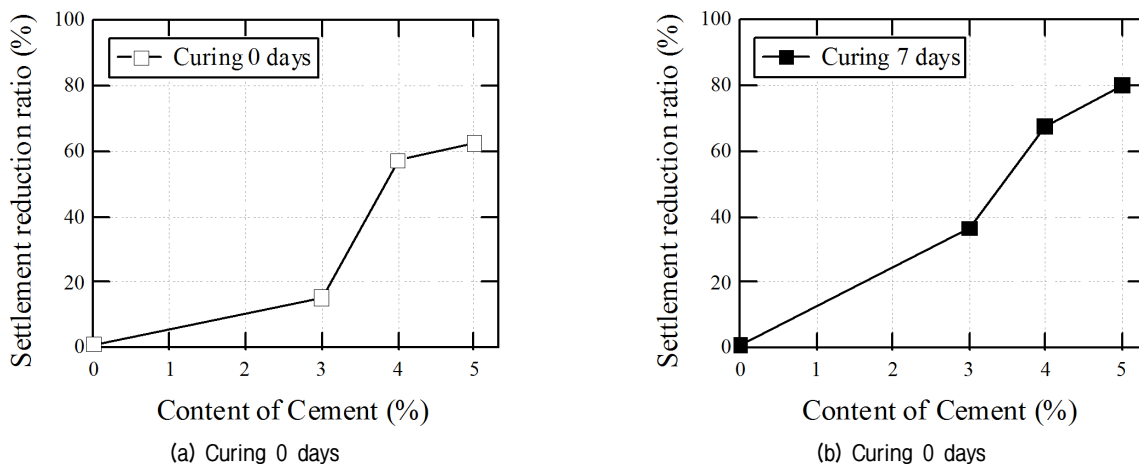


Fig. 7. Settlement reduction ratio

Table 7. Settlement reduction ratio

Curing period	Content cement			Note
	3%	4%	5%	
0 days	15.3%	57.1%	62.5%	Based on 500,000 cyclic loading
7 days	36.4%	67.4%	80.1%	

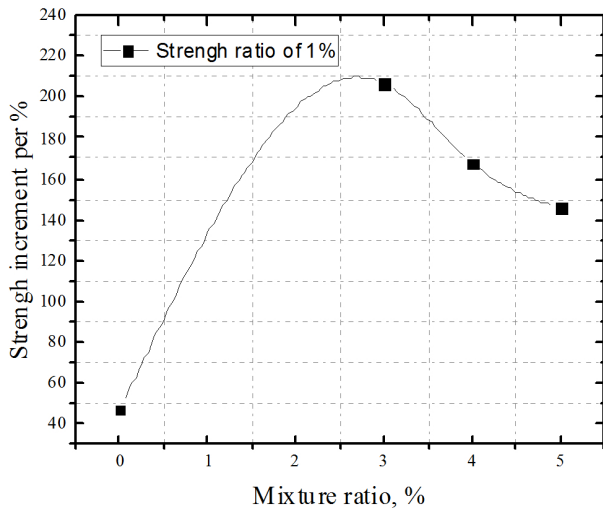


Fig. 8. The CBR value on Cement treated aggregate with the 1% cement

5. 결론

본 연구에서는 철도교대 뒤채움재에 대하여 대형전단 시험을 통해 역학적 특성을 검토하였으며, 원형모형실험을 이용하여 시멘트 함유량과 양생기간을 두어 반복하중에 따른 침하특성을 정량적으로 평가하였다. 또한 CBR 시험을 통해 뒤채움재료의 양생에 따른 강도특성을 관찰하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 교대 접속부 뒤채움재료인 시멘트 안정처리된 골재, 일반 골재, 토사의 내부마찰각은 32.95°, 37.21°, 40.38°로 시멘트 안정처리된 골재의 내부마찰각은 일반토사보다 약 23% 더 크게 나타났다.
- (2) 일반 골재는 반복하중에 따른 침하량이 지속적으로 발생하는 반면 시멘트 안정처리된 골재는 반복하중에 따른 침하량이 수렴하며, 양생함에 따라 침하량도 감소하였다. 일반 골재를 기준으로 한 침하율은 3% 시멘트 안정처리 된골재가 양생 7일경과 후 23.9% 감소하였으며, 4%, 5% 시멘트 안정처리된 골재가 각각 12.1, 17.6% 감소하였다. 시멘트함유량별 침하율은 재령 0일을 기준으로 38.3~89.6%로 감소하였으며, 재령 7일 기준으로 20.8~65.8% 감소하였다. 탄성침하량은 일반 골재는 0.4mm, 3%시멘트 안정처리된 골재는 0.06mm으로 계산 되었으며, 일반 골재의 탄성침하량이 3%시멘트 안정처리된 골재의 약 7배로 확인하였다.

- (3) 시멘트양생에 따른 뒤채움재료의 강도변화는 재령 0일차에는 일반 골재 및 시멘트 안정처리된 골재가 시멘트 함유량에 따라 CBR값의 차이가 크지 않으나 재령 3일이 경과 후 시멘트 안정처리 된골재(3%, 4%, 5%)의 CBR값이 1.5배이상 증가하였다. 양생시간이 경과함에 따라 재령 28일까지 1.5~8.7배의 CBR값이 증가하였다. 재령 28일을 기준으로 일반골재 대비 시멘트 안정처리된 골재(3%, 4%, 5%)의 증가율은 13배에서 16배의 CBR값이 증가하는 것을 확인하였다. 또한 철도설계기준에서 제시하고 있는 슬래그의 CBR 최소요구 값인 80보다 약 7.8~9.1배 높다.
- (4) 시멘트 안정처리된 골재의 노반에서 1차 침하 이후 추가적인 침하 혹은 잔류침하가 발생하는 구간은 시멘트 혼합 비율이 4%가 적합 하며, 강도증진만이 요구되는 구간은 3%가 적합한 것으로 확인하였다.

참고문헌 (References)

1. Bowles, J. E. (1979), "Physical and Geotechnical Properties of Soil, McGraw-hill Book Company, USA.
2. Choi, C.Y., Kim, H.K., Chung, K.Y., and Yang, S.B. (2015), "Train-Structure Dynamic Interaction Analysis of The Bridge Transition Considering Track Irregularity", *Journal of the Korean geotechnical society*, Vol.31, No.9, pp.29-38.
3. Kim, K.Y., Park, H.K., and Jeon, J.S. (2005), "Strength Characteristics of Cemented Sand and Gravel", *Journal of the Korean geotechnical society*, Vol.21, No.10, pp.61-71.
4. Korea Rail Network Authority (2013), Guidelines of Track Maintenance.
5. Lee, K.H., Jang, T.Y., Hwang, T.J., and Song, Y.S. (2011), "Strength Properties of Subgrade Soil Modified by Cement", *Journal of Korean Society Of Hazard Mitigation*, Vol.11, No.5, pp.141-147.
6. Lee, S.W., Jeon, B.J., and Kim, J.W. (2004), "Analysis of Characteristics in Low - Shrinkage Cement Treated Base", *Journal of Korean Society of Road Engineers*, Vol.6, No.2, pp.61-70.
7. Min, T.K., Hwang, K.M., and Park, G.H. (2001), "Soil Stabilization with Lime and Chemical Additives", *Journal of the Korean geotechnical society*, Vol.17, No.4, pp.145-151.
8. Park, S.W. and Ji, J.K.(2006), "Comparison of Mixing Methods for Stabilizing Subgrade Soils", *Conference of Korean Society of Road Engineers*, Vol.2006, No.10, pp.193-197.
9. Ronald L. Terrel, Jon A. Epps, Ernest J. Barenerg, Janes K. Mitchell, and Marshall R. Thompson (1979), "Soil Stabilization In Pavement Structures A User's Manual", FHWA department of transportation washington, D.C. 20590.
10. Sato, Y. (1997), New railway Track engineering Mechanics.

Received : June 23rd, 2016

Revised : August 9th, 2016

Accepted : September 12th, 2016